Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Simulation of Nanofluid Flow at Low Reynolds Number in a Microchannel with One-Sided Sudden Expansion under the Effect of a Magnetic Field

Research Article

Foroozan Moradi[1], Pedram Pournaderi[2]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.79298.1143

1. Introduction

One of the most important problems in industry is the control of heat transfer. Based on the available studies nanoparticles can help to improve and increase the heat transfer of the base fluid. A channel with a backward-facing step can be a sample to study the flow separation phenomenon. The flow separation and reattachment phenomenon that is occurred due to the sudden expansion of the cross-section of a channel is one of the important applied cases.

The idea of adding nanoparticles to a fluid to increase heat transfer was first introduced in 1873. Most of researchers have expressed that adding nanoparticles with higher thermal conductivity to the base fluid leads to the enhancement of the thermal performance of the obtained nanofluids.

The flow of an electrically conducting fluid under a magnetic field which is called Hartmann flow was widely investigated after experimental research of Hartmann on mercury flow in a tube under a magnetic field. A limited number of researches have been carried out on the laminar nanofluid flow in a channel with one-sided sudden expansion. Nevertheless, the impact of the magnetic field on the nanofluid flow in this geometry has not been investigated for flows with low velocities (low Reynolds numbers). In this study, the impact of a uniform magnetic field perpendicular to the flow direction on the hydrodynamics and heat transfer of Cu-water nanofluid flow in a microchannel with one-sided sudden expansion at a low Reynolds number is investigated numerically.

2. Modeling and numerical methods

Figure 1 shows that the geometry of the problem is a backward-facing step microchannel which has a length of 0.25 m, an outlet height of 0.001 m, and a step height of 600 µm. The length of the wall upstream of the step and expansion ratio are 0.1 m and 2.5, respectively. The angle of the magnetic field is 90^0. A heat flux of 500 W/m^2 is applied on the wall that is downstream of the step.

The governing equations include mass, momentum, and energy conservation equations in incompressible cases. The effect of the magnetic field is added as a source term to the right side of the momentum equation. These equations are solved using the finite difference method. Temporal, convection and diffusion terms are discretized using 3rd- order Runge-Kutta, second-order upwind, and second-order central approximation, respectively. The projection method is used to solve the flow equations. The homogenous model is employed to apply the effect of nanoparticles. In this model, nanofluid is considered a homogenous fluid and only its properties are modified based on the concentration of nanoparticles.

3. Results

In this section, the impact of the magnetic field on the hydrodynamics and heat transfer of Cu-water nanofluid at a low Reynolds number (Re=1) is investigated.

Figure 2 indicates the velocity distribution for various Hartmann numbers at a volume fraction of 0.02. It is observed that under the magnetic field, the average velocity of nanofluid is reduced and the velocity gradient on the channel wall is increased.

Figure 3 presents the average friction coefficient versus volume fraction for different Hartmann numbers. At zero

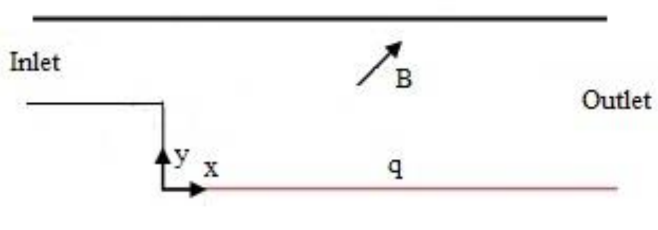


Fig. 1. Geometry of the problem

*Manuscript received, October 21, 2022. Revised, February 11, 2023, Accepted, April 25, 2022.

[1]. MSc, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

[2]. Corresponding author. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

Email: sp.pournaderi@yu.ac.ir

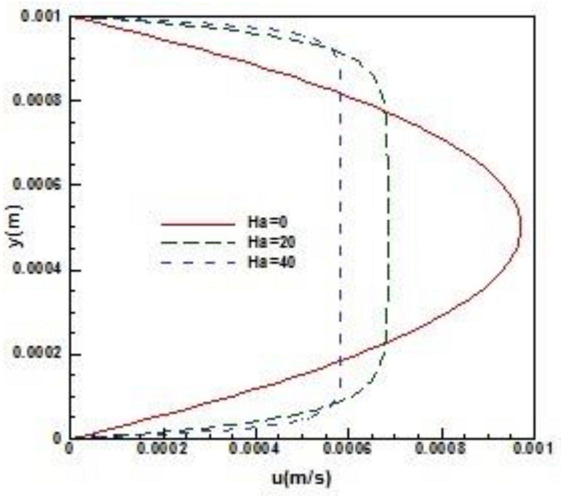


Figure 2. Velocity distribution at volume fraction of 0.02 (x=0.01m)

Hartmann number, the increase of volume fraction has a slight impact on the friction coefficient. According to Figure 2, by increasing of volume fraction velocity gradient and consequently shear stress on the wall increase. On the other hand, by increasing volume fraction at a constant Reynolds number, due to the increase of nanofluid kinematic viscosity, velocity and consequently dynamic pressure increase. The increase in shear stress is almost negated by the increase in dynamic pressure and therefore no change occurs in the friction coefficient. Under the magnetic field, the friction coefficient reduces by increasing the volume fraction. In this case, the increase in fluid dynamic pressure is higher than the increase in wall shear stress.

Figure 4 indicates the impact of the magnetic field and volume fraction on the average Nusselt number. At a Reynolds number of 1, by increasing of volume fraction temperature gradient on the wall decreases, and the thermal conductivity coefficient increases. Nevertheless, the reduction of the wall temperature gradient is dominant and as a result, the Nusselt number decreases. It is noteworthy that at high Reynolds numbers, the Nusselt number increases with an increase in volume fraction. According to Figure 4, the applied magnetic field has no remarkable effect on the Nusselt number. At Reynolds number of 1, the effect of convective heat transfer is slight and the conduction mechanism is dominant. Therefore, the magnetic field has no important impact on temperature distribution. This finding is in contrast with the results of previous studies for higher Reynolds numbers which show the increase of Nusselt number with Hartmann number.

4. Conclusion

In this study, the impact of a magnetic field on the hydrodynamics and heat transfer of laminar flow of Cu-water nanofluid in a channel with one-sided sudden expansion at a low Reynolds number was investigated. The governing equations include mass, momentum, and energy conservation equations. The homogenous model was used to apply the effect of nanoparticles.

By increasing the magnetic field intensity, the nanofluid velocity decreases and the velocity gradient on the wall increases. Under a magnetic field, the friction coefficient decreases with volume fraction and increases with magnetic field strength.

At low Reynolds numbers, contrary to high Reynolds numbers, by increasing the volume fraction the Nusselt number decreases. Moreover, contrary to high Reynolds numbers, in this case, the magnetic field has no effect on the Nusselt number. At low Reynolds numbers, applying a magnetic field improves the overall performance of the system.

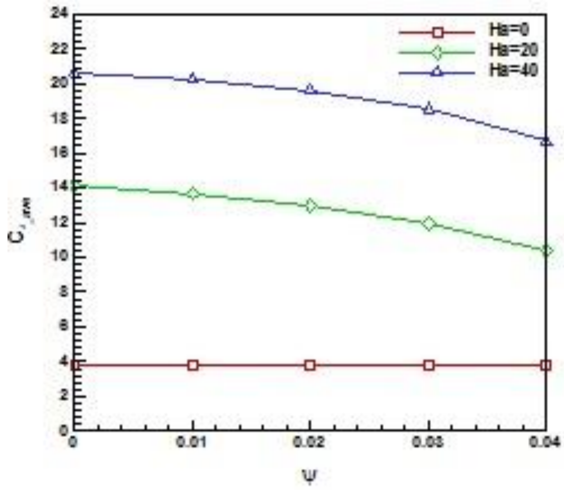


Figure 3. Effect of magnetic field on average friction coefficient

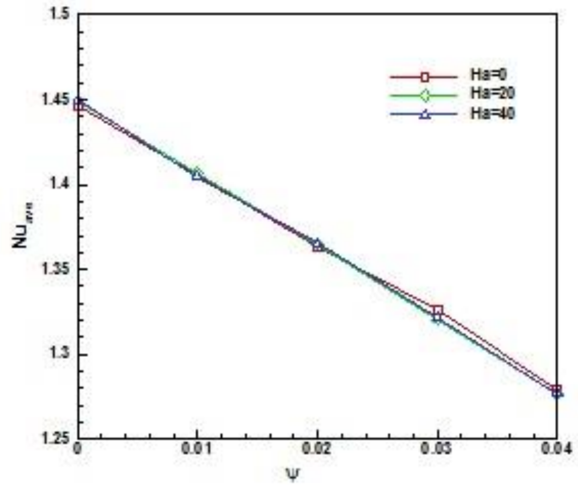


Figure 4. Effect of magnetic field on average Nusselt number

دانشگاه فردوسی مشهد

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

شبیه‌سازی جریان نانوسیال در عدد رینولدز پایین دریک میکروکانال با انبساط ناگهانی یک‌طرفه تحت اثر میدان مغناطیسی *

مقاله پژوهشی

فروزان مرادی[۱]   پدرام پورنادری[۲]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.79298.1143

چکیده *در این مطالعه، تأثیر میدان مغناطیسی بر هیدرودینامیک و انتقال حرارت جریان آرام نانوسیال در یک میکروکانال همراه با انبساط ناگهانی یک‌طرفه در عدد رینولدز پایین بررسی می‌شود. معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی با توسعه یک کد به زبان برنامه نویسی فرترن به روش تفاضل محدود بر روی یک شبکه جابه‌جا شده گسسته‌سازی و حل می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در عدد رینولدز پایین، گردابه‌ای بعد از پله تشکیل نمی‌گردد. در حضور میدان مغناطیسی، ضریب اصطکاک با افزایش کسرحجمی کاهش می‌یابد. در کسرحجمی ۴ درصد، این کاهش در مقایسه با آب خالص در اعداد هارتمن ۲۰ و ۴۰ به‌ترتیب ۲۵ درصد و ۱۸ درصد است. با اعمال میدان مغناطیسی ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. برای نانوسیال با غلظت ۴ درصد، افزایش ضریب اصطکاک متوسط در مقایسه با آب در اعداد هارتمن ۲۰ و ۴۰ به‌ترتیب ۱۷۶ و ۳۳۷ درصد می‌باشد. در عدد رینولدز پایین، تأثیر میدان مغناطیسی بر روی عدد ناسلت ناچیز می‌باشد. با افزایش کسرحجمی عدد ناسلت کاهش می‌یابد. در کسرحجمی ۴ درصد، تقریبا ۱۲ درصد کاهش در عدد ناسلت در مقایسه با آب مشاهده می‌گردد. بررسی معیار ارزیابی عملکرد نشان می‌دهد که اعمال میدان مغناطیسی، منجر به بهبود عملکرد سیستم می‌گردد. در عدد هارتمن ۲۰ و کسرحجمی ۴ درصد، حدود ۱۱ درصد افزایش در ضریب عملکرد نسبت حالت بدون میدان مشاهده می‌شود.*

واژه‌های کلیدی نانوسیال، میکروکانال، انبساط ناگهانی، میدان مغناطیسی، عدد رینولدز پایین.

Simulation of Nanofluid Flow at Low Reynolds Number in a Microchannel with One-Sided Sudden Expansion under the Effect of a Magnetic Field

Foroozan Moradi   Pedram Pournaderi

Abstract *In this study, the magnetic field effect on the hydrodynamics and heat transfer of the laminar flow of a nanofluid in a microchannel with one-sided sudden expansion at a low Reynolds number is investigated. The governing equations including mass, momentum, and energy conservation equations are discretized and solved on a staggered grid using the finite difference method by developing a Fortran code. The simulation results show that at a low Reynolds number, no vortex is formed after the step. In the presence of a magnetic field, the friction coefficient decreases with volume fraction. At a volume fraction of 0.04, this reduction in comparison with water at Hartmann numbers of 20 and 40 is 25 and 18 percent, respectively. By applying the magnetic field, the friction factor increases. For nanofluid with a volume fraction of 0.04, the enhancement of average friction factor in comparison with water at Hartmann numbers of 20 and 40 is 176 and 337 percent, respectively. At a low Reynolds number, the magnetic field effect on the Nusselt number is negligible. The Nusselt number decreases with volume fraction. At a volume fraction of 0.04, a reduction of about 12 percent is observed in the Nusselt number in comparison with water. Examining the performance evaluation criteria shows that applying a magnetic field improves the system's performance. At a Hartmann number of 20 and volume fraction of 0.04, an enhancement of about 11 percent in performance coefficient is observed in comparison with the case that the magnetic field is absent.*

Key Words Nanofluid, Microchannel, Sudden expansion, Magnetic field, Low Reynolds number.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۷/۲۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۲/۵ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج.

Email: sp.pournaderi@yu.ac.ir

مقدمه

یکی از مسائل مهم در صنعت، کنترل انتقال حرارت می‌باشد. طبق مطالعات انجام شده نانوذرات می‌توانند به بهبود انتقال حرارت کمک کنند و نرخ انتقال حرارت سیال پایه را افزایش دهند. هندسه کانال پله با انبساط ناگهانی می‌تواند یک نمونه مطالعاتی از پدیده جدایش جریان باشد. پدیده جدایش جریان و اتصال مجدد بعدی که به‌دلیل گسترش ناگهانی محل عبور جریان مانند وجود پله رخ می‌دهد، به‌عنوان یکی از موارد پرکاربرد مهم صنعتی مطرح می‌باشد. تحقیقات مختلفی در زمینه جریان و انتقال حرارت سیال در کانال با انبساط ناگهانی انجام شده است [1].

مفهوم نانوسیالات با تعلیق ذرات فلزی یا غیرفلزی در مایعات پایه به نوع جدیدی از سیالات انتقال حرارت اشاره دارد. متداول‌ترین سیالات پایه آب، روغن و مخلوط اتیلن-گلیکول هستند. ایده افزودن ذرات به سیال برای افزایش انتقال گرما در سال ۱۸۷۳ بیان شد [2]. در سال ۱۹۹۵، واژه نانوسیال توسط چویی (Choi) [3] برای نشان دادن محلول‌های تهیه شده توسط نانو ذرات با قطر کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر مطرح شد. بیشتر محققان استدلال می‌کنند که افزودن نانوذرات با رسانایی حرارتی بالاتر به سیال پایه منجر به افزایش عملکرد حرارتی نانوسیال‌های حاصل می‌شود [4]. خربیت و همکاران [5] مطالعات تجربی و عددی را برای بررسی ویژگی‌های انتقال حرارت جریان آرام نانوسیال در یک میکرو کانال با پله پسرو انجام دادند. مطالعه عددی به صورت سه‌بعدی با استفاده از مدل تک‌فازی و با در نظر گرفتن اثر براونی و اعمال شار حرارتی ثابت بر روی دیواره پایین دست پله انجام شد. تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی مشاهده گردید. نتایج برای دو نانوسیال آب-اکسید سیلیسیوم و آب-اکسید آلومینیوم ارائه شدند. نتایج نشان می‌دهد نانوسیال آب-اکسید سیلیسیوم عدد ناسلت بیشتری دارد. همچنین ضریب اصطکاک هنگام استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم بیشتر از نانوسیال آب-اکسید سیلیسیوم است. سلیمفندیگیل (Selimefendigil) و اوزتوپ (Oztop) [6] جریان جابه‌جایی اجباری آرام ضربانی نانوسیال را بر روی پله پسرو با استفاده از روش حجم محدود و مدل همگن بررسی کردند. بخشی از دیواره پایین‌دست پله موج‌دار (موج مثلثی شکل) و در دمای ثابت در نظر گرفته شد. مشاهده گردید که عدد ناسلت میانگین با افزایش عدد رینولدز، افزایش طول و ارتفاع موج مثلثی شکل پایین‌دست کانال و افزایش دامنه ضربان افزایش می‌یابد. در مدت زمان طولانی، سیرکولاسیون جریان در دیواره موجدار می‌تواند باعث جدا شدن نانوذرات از محلول گردد. محمد و همکاران [7] به بررسی عددی اثرات چهار نوع مختلف مانع شامل مانع مدور، مانع مثلثی رو به جلو، مانع مثلثی رو به عقب و مانع ذوزنقه‌ای بر جابه‌جایی ترکیبی جریان آرام نانوسیال در کانال همراه با انبساط ناگهانی یک‌طرفه با استفاده از روش حجم محدود و با فرض سیال همگن پرداختند. نتایج نشان می‌دهد مانع مثلثی شکل رو به جلو دارای بالاترین مقدار عدد ناسلت متوسط و ضریب اصطکاک و مانع ذوزنقه‌ای شکل کمترین مقدار را برای این کمیت‌ها دارد. مویدی [8] اثر جریان تزریقی نوسانی به داخل کانال با پله پسرو را روی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال به صورت عددی مطالعه کرد. او از مدل همگن برای مدل‌سازی اثر نانوذرات استفاده نمود. همچنین اثر براونی در محاسبه ضریب رسانش در نظر گرفته شد. بر طبق نتایج حاصل، جریان تزریقی نوسانی یک رفتار پریودیک در میدان جریان و انتقال حرارت ایجاد می‌کند که منجر به یک مکانیزم موثر برای افزایش انتقال حرارت می‌گردد. پورنادری و آرام [9] انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال در یک کانال با پله پسرو را به روش حجم محدود بررسی کردند. اثر نانوذرات با استفاده از مدل همگن مطالعه گردید. ایجاد گردابه در پایین‌دست پله باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود. شش نوع نانوذره دی‌اکسید تیتانیوم، اکسید آهن، اکسید مس، اکسید آلومینیوم، اکسید روی و دی‌اکسید سیلیسیوم مقایسه شدند. بیشترین عدد ناسلت متوسط مربوط به نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بود. همچنین نتیجه‌گیری شد که تأثیر نوع نانوسیال بر افت فشار قابل‌توجه نمی‌باشد.

یانگ و همکاران [10] جریان نانوسیال را در رژیم انتقالی روی پله پسرو به صورت آزمایشگاهی و عددی (بر اساس مدل تک‌فازی) مطالعه کردند. آنها دریافتند که طول گردابه تشکیل شده بعد از پله با افزایش عدد رینولدز و ارتفاع پله افزایش می‌یابد. افزایش ارتفاع پله باعث افزایش انتقال حرارت و در عین حال باعث افزایش افت فشار می‌گردد. اونیشی و یاماموتو [11] اثر نسبت منظری (Aspect ratio) نانوذرات میله‌ای شکل را روی رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی نانوسیال در جریان آرام روی پله

پسرو با استفاده از روش حجم محدود مطالعه کردند. برای محاسبه ضریب لزجت نانوسیال از مدلی مربوط به سوسپانسیون ذرات کروی کشیده شده و برای محاسبه ضریب رسانش حرارتی از مدل همیلتون-کراسر (Hamilton-Crosser) استفاده گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که هنگامی که نانوذرات نسبت منظری بزرگ‌تری دارند، افزودن نانوذرات باعث افزایش بیشتری در انتقال حرارت می‌شود.

جریان یک سیال رسانای الکتریکی تحت یک میدان مغناطیسی عمودی در یک کانال که جریان هارتمن نامیده می‌شود، به طور گسترده بعد از تحقیق آزمایشگاهی هارتمن روی جریان جیوه در لوله تحت اثر میدان مغناطیسی ثابت مورد بررسی قرار گرفت [12]. سلیمفندیگیل و اوزتوپ [13] تأثیر زاویه شیب میدان مغناطیسی بر جابه‌جایی ترکیبی جریان آرام نانوسیال در یک کانال با پله پسرو را به صورت عددی و با استفاده از مدل تک‌فازی بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش عدد رینولدز و کسرحجمی نانوذرات جامد باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود. تحت اثر میدان مغناطیسی، اندازه گردابه تشکیل شده در پشت پله کاهش می‌یابد به طوری که اگر میدان مغناطیسی به اندازه کافی قوی باشد، گردابه‌ای تشکیل نخواهد شد. با افزایش زاویه شیب میدان مغناطیسی و قدرت میدان مغناطیسی میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. مهرز (Mehrez) و کافسی (Casfi) [14] جابه‌جایی اجباری جریان نانوسیال ترکیبی آب-اکسید آلومینیوم-مس در کانال با انبساط ناگهانی را تحت یک میدان مغناطیسی غیر یکنواخت با استفاده از روش حجم محدود و با بکارگیری مدل همگن مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که با افزایش عدد هارتمن سیرکولاسیون جریان پشت پله تضعیف می‌شود. برای میدان‌های مغناطیسی ضعیف‌تر، عدد ناسلت با افزایش شدت میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد ولی برای میدان‌های قوی‌تر افزایش عدد ناسلت مشاهده می‌گردد. سلیمفندیگیل و همکاران [15] تاثیر سه مدل مختلف ضریب رسانش الکتریکی نانوسیالات در جابه‌جایی ترکیبی جریان نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در حضور میدان مغناطیسی در کانال با پله پسرو را با استفاده از روش اجزاء محدود و بر اساس مدل تک‌فازی بررسی کردند آنها دریافتند که بکارگیری مدل‌های مختلف ضریب رسانش الکتریکی نانوسیال می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر میزان انتقال حرارت در حضور میدان مغناطیسی داشته باشد. حسین و احمد [16] جابه‌جایی اجباری فروسیال آب-اکسید آهن بر روی یک پله پسرو را در حضور یک استوانه چرخان بعد از پله تحت اثر میدان مغناطیسی با استفاده از مدل همگن مطالعه کردند. با افزایش عدد هارتمن، ضریب درگ افزایش و ضریب لیفت و عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابند. افزایش کسرحجمی نانوسیال، موجب کاهش ضریب درگ و افزایش ضریب لیفت و عدد ناسلت متوسط می‌گردد. گریدنمز (Geridönmez) و اوزتوپ [17] جابه‌جایی ترکیبی جریان نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم-اکسید آهن تحت اثر میدان مغناطیسی بر روی پله پسرو را به کمک مدل تک‌فازی مطالعه کردند. آنها با بررسی چهار توزیع سرعت ورودی مختلف این نتیجه رسیدند افزایش نانوذرات مغناطیسی تأثیر قابل‌توجهی در انتقال گرمای جابه‌جایی به ویژه در حالت توزیع سرعت سینوسی دارد. نتایج حاصل نشان داد که توزیع سرعت ورودی و میدان مغناطیسی می‌توانند به‌عنوان پارامترهایی برای کنترل انتقال حرارت و جریان سیال استفاده شوند. منه (Manh) و همکاران [18] با بکارگیری مدل همگن رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی یک فروسیال را در کانال با انبساط ناگهانی تحت اثر یک میدان مغناطیسی غیر یکنواخت شبیه‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزایش نرخ انتقال حرارت با افزایش تعداد منابع (Source) میدان مغناطیسی قویا تشدید می‌گردد. قاچم و همکاران (Manh) و همکاران [19] شبیه‌سازی هایی را بر اساس مدل همگن برای ارزیابی اثرات نصب یک لایه متخلخل روی انتقال حرارت جابه‌جایی یک نانوسیال هیبریدی در یک کانال با پله پسرو در حضور میدان مغناطیسی انجام دادند. پدیده های تضعیف گردابه و افزایش انتقال حرارت که در حضور میدان مغناطیسی اتفاق می افتند، با افزایش تخلخل لایه نصب شده تقویت می‌شوند.

با توجه به تحقیقات پیشین مشاهده می‌شود که تحقیقات محدودی در زمینه تاثیر میدان مغناطیسی بر جریان آرام نانوسیال در کانال با انبساط ناگهانی یک‌طرفه انجام شده است. با این وجود اثر میدان مغناطیسی بر جریان نانوسیال در این هندسه برای جریان‌های با سرعت‌های پایین (عدد رینولدز پایین) مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این تحقیق، اثر میدان مغناطیسی عمود بر جهت جریان بر هیدرودینامیک و انتقال حرارت نانوسیال آب-

مس در یک میکروکانال با انبساط ناگهانی یک‌طرفه در عدد رینولدز پایین به صورت عددی بررسی می‌شود. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در این تحقیقات تمرکز محققان بر روی مطالعه اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت (تغییرات عدد ناسلت) بوده است. در این تحقیق، تاثیر میدان مغناطیسی هم بر روی هیدرودینامیک جریان (تغییرات ضریب اصطکاک) و هم بر روی انتقال حرارت (تغییرات عدد ناسلت) بررسی می‌شود و سپس عملکرد کلی سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

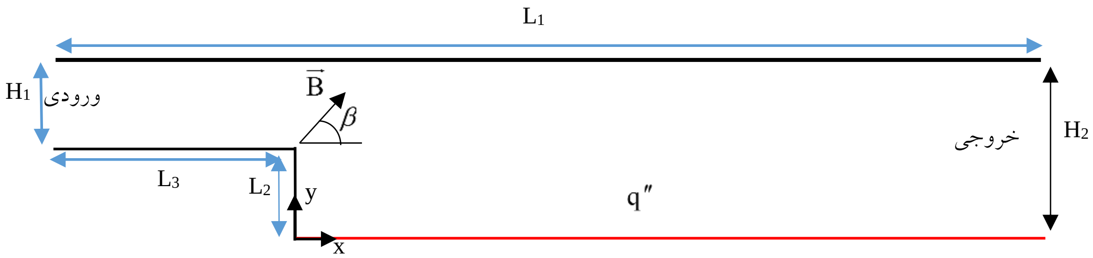
هندسه مسئله و شرایط مرزی

هندسه مسئله مطابق شکل (۱) میکروکانالی با پله پسرو با ابعادی به طول ۰/۲۵ متر، طول بالادست پله ۰/۱ متر، عرض خروجی کانال ۰/۰۰۱ متر، نسبت عرض خروجی به عرض ورودی کانال برابر ۲/۵ و ارتفاع پله ۶۰۰ میکرومتر است که در تحقیق انجام شده توسط خربیت و همکاران [5] استفاده شده است. میدان مغناطیسی $\vec{B}$ با زاویه β برابر با ۹۰ درجه اعمال می‌شود.

خصوصیات ترموفیزیکی نانوذره و آب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در جدول (۱) ذکرشده اند. در ورودی سرعت و دمای مشخصی اعمال می‌شود. سرعت متوسط ورودی V_{in} با داشتن عدد رینولدز از رابطه (۱) به دست می‌آید. همچنین، دمای ورودی نانوسیال ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

$$Re = \frac{\rho\, v_{in}(2H_1)}{\mu} \qquad (۱)$$

در مرز ورودی با داشتن سرعت متوسط ورودی V_{in}، از پروفیل سرعت جریان آرام، پایا و توسعه‌یافته ا ستفاده می شود. روی مرز جامد شرط عدم لغزش برای سرعت و شرط گرادیان صفر برای فشار در جهت عمود بر دیوار اعمال می‌گردد. در خروجی فشار ثابت و گرادیان صفر در جهت جریان برای سایر کمیت‌ها اعمال می شود. بر روی دیواره پایین‌دست کانال بعد از پله شار ثابت ۵۰۰ وات بر مترمربع اعمال می‌گردد. سایر دیواره‌ها عایق در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱ هندسه مسئله

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی نانوذره مس و آب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد

نوع ماده	ضریب انبساط حرارتی $\beta(1/K)$	ظرفیت گرمایی ویژه $C_p(J/kgK)$	ضریب رسانش $k(W/mK)$	لزجت $\mu(kgm^{-1}s^{-1})$	چگالی $\rho(kg/m^3)$	هدایت الکتریکی $\sigma(S/m)$
آب	2.06×10^{-4}	4182.2	0.613	0.00101	998.203	0.5
مس	1.67×10^{-5}	383	400	–	8954	5.97×10^{7}

معادلات حاکم و روش‌های عددی

معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی با لحاظ کردن ویژگی‌های ترموفیزیکی نانوسیال می‌باشند [13]. در معادلات، اندیس nf به نانوسیال اندیس f به سیال پایه اشاره دارد. α_{nf} ضریب پخش حرارتی نانوسیال می‌باشد. متغیرهای بی‌بعد به صورت زیر تعریف می‌شوند. در معادلات زیر، $D_h = 2H_1$ قطر هیدرولیکی می‌باشد.

$$X=\frac{x}{D_h}\ ,\ Y=\frac{y}{D_h}\ ,\ U=\frac{u}{v_{in}}\ ,\ V=\frac{v}{v_{in}} \qquad (۲)$$

$$P=\frac{p}{\rho\, v_{in}^2}\ ,\ \theta=\frac{T-T_{in}}{(q''D_h/k)}\ ,\ \tau=\frac{t\,v_{in}}{D_h} \qquad (۳)$$

شکل بی‌بعد شده معادلات به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial U}{\partial X+\frac{\partial V}{\partial Y=0}} \qquad (۴)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau}+U\frac{\partial U}{\partial X}+V\frac{\partial U}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial X}+\frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}\right)-U\frac{Ha^2}{Re}$$

(۵)

$$\frac{\partial V}{\partial \tau}+U\frac{\partial V}{\partial X}+V\frac{\partial V}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial Y}+\frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}\right)+\frac{Gr}{Re^2}\theta$$

(۶)

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}+U\frac{\partial\theta}{\partial X}+V\frac{\partial\theta}{\partial Y}=\frac{1}{PrRe\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2}\right)} \qquad (۷)$$

اعداد بی‌بعد حاصل، اعداد پرانتل، رینولدز و هارتمن می‌باشند:

$$Pr=\frac{\nu}{\alpha}\ ,\ Re=\frac{\rho\, v_{in}\, D_h}{\mu}\ ,\ Ha=D_h\, B_0\sqrt{\frac{\sigma}{\mu}}\ ,\ Gr=\frac{g\beta q'' D_h^4}{k\nu^2}$$

(۸)

معادلات حاکم با استفاده از روش تفاضل محدود حل می‌شوند. جملات زمانی با استفاده از روش رانگ-کوتای (Runge-Kutta) مرتبه ۳ [20]، جملات جابه‌جایی با استفاده از تقریب بالادستی (Upwind) مرتبه دو و جملات پخش با استفاده از تقریب مرکزی مرتبه دو روی یک شبکه جابه‌جا شده گسسته‌سازی می‌شوند. برای حل معادلات جریان از روش تصویرسازی (Projection method) [20,21] استفاده می‌شود. معادلات حاکم به صورت غیردائم تا رسیدن به حالت دائم حل می‌شوند. معیار توقف حل معادلات برای رسیدن به حالت دائم $\sum_{i,j}\left|A^{n+1}{}_{i,j}-A^{n}{}_{i,j}\right|\le 10^{-9}$ است که n گام زمانی و A کمیت موردنظر نظیر مولفه‌های سرعت و دما می باشد.

مدل همگن

در این مدل، نانوسیال به‌عنوان یک سیال همگن در نظر گرفته می‌شود و فقط خصوصیات ترموفیزیکی آن بر اساس غلظت نانوذره اصلاح می‌شود. در این حالت، فرض بر این است که مایع پایه و نانوذرات در تعادل گرمایی هستند و با سرعت برابر حرکت می‌کنند. در این پژوهش، از معادلات زیر برای تخمین خواص نانوسیال استفاده می‌شود. ρ_{nf}، $C_{p,nf}$، β_{nf} و ϕ به ترتیب چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب انبساط حرارتی و کسرحجمی نانوسیال می‌باشند [5]. اندیس f به سیال پایه اشاره دارد.

$$\rho(1-\varphi)np_{f_{nf}} \qquad (۶)$$

$$(C_p)_{nf}=\frac{(1-\varphi)(\rho C_p)_f+\varphi(\rho C_p)_{np}}{(1-\varphi)(\rho)_f+\varphi(\rho)_{np}} \qquad (۷)$$

$$(\beta)_{rf}=\frac{(1-\varphi)(\beta\rho)_f+\varphi(\beta\rho)_{np}}{(1-\varphi)(\rho)_f+\varphi(\rho)_{np}} \qquad (۸)$$

برای محاسبه لزجت نانوسیال از رابطه کورچیو نه (Massimo Corcione) ا ستفاده می شود [22]. در این رابطه d_f قطر مولکولی سیال پایه و N عدد آووگادرو (Avogadro constant) و M وزن مولکولی (Molecular weight) سیال پایه است. اندیس np به نانوذره اشاره دارد.

$$\mu_{nf}=\frac{\mu_f}{1-34.87(d_{nf}/d_f)^{-0.3}\varphi^{1.03}} \qquad (۹)$$

$$d_f=\left[\frac{6M}{N\,\pi\rho_{f0}}\right] \qquad (۱۰)$$

چگالی سیال پایه در دمای ۲۹۳ کلوین می‌باشد.

هدایت حرارتی نانوسیال k_{nf}، به صورت مجموع هدایت حرارتی استاتیکی و هدایت حرارتی ناشی از حرکت براونی نانوذرات در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه هدایت حرارتی مؤثر استاتیکی از مدل ماکسول-گرانت (Maxwell-Grant model) [2] و برای اثر براونی از مدل وجها و همکاران (Vajjha et al) [23] استفاده می‌شود. K_b ثابت بولتزمن و d_{np} قطر نانوذره

و برابر با ۲۸ نانومتر می‌باشد.

$$k_{nf} = k_{static} + k_{brownain} \qquad (۱۱)$$

$$k_{nf} = k_f \left(\frac{k_{np} + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_{np})}{k_{np} + 2k_f + \varphi(k_f - k_{np})} \right) + k_{brownain} \qquad (۱۲)$$

$$k_{brownain} = 5 \times 10^4 \times \rho_f \times \beta \times \varphi \times C_{pf} \sqrt{\frac{k_b T}{\rho_{np} d_{np}}} \times f'(T, \varphi) \qquad (۱۳)$$

$$f'(T, \varphi) = (2.8217 \times 10^{-2}\varphi + 3.917 \times 10^{-3}) \left(\frac{T}{T_0}\right) + (-3.0669 \times 10^{-2}\varphi - 3.91123 \times 10^{-3}) \qquad (۱۴)$$

T_0 بیانگر دمای مرجع می‌باشد.

محاسبه عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و معیار ارزیابی عملکرد نانوسیال

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی از رابطه (۱۵) برحسب پارامترهای نانوسیال و عدد ناسلت از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شوند [24]. T_{in} دمای ورودی نانوسیال، L طول کانال بعد از پله، q'' شار اعمالی به دیواره پایین‌دست پله و T_w دمای این دیواره است. قطر هیدرولیکی کانال برابر است با $D_h = 2H_1$.

$$h = \frac{q''}{T_{bulk} - T_w} \qquad (۱۵)$$

$$T_{bulk} = T_{in} + \frac{q'' x}{\rho_{nf} V_{in} L C_{p,nf}} \qquad (۱۶)$$

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \qquad (۱۷)$$

ضریب اصطکاک دیواره از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$C_f = \frac{\mu_{nf} \left[\frac{\partial u}{\partial y}\right]_{y=0}}{(\frac{1}{2}\rho_{nf} V_{in}^2)} \qquad (۱۸)$$

معادله (۱۹) معیار ارزیابی عملکرد نانو سیال نسبت به سیال پایه (آب) را تعریف می‌کند. زمانی که این کسر از عدد یک بزرگ‌تر شود بیانگر آن است که میزان انتقال حرارت بیشتر از ضریب اصطکاک است یا به عبارتی مبین میزان تأثیر بیشتر استفاده از نانوسیال نسبت به سیال خالص است [25].

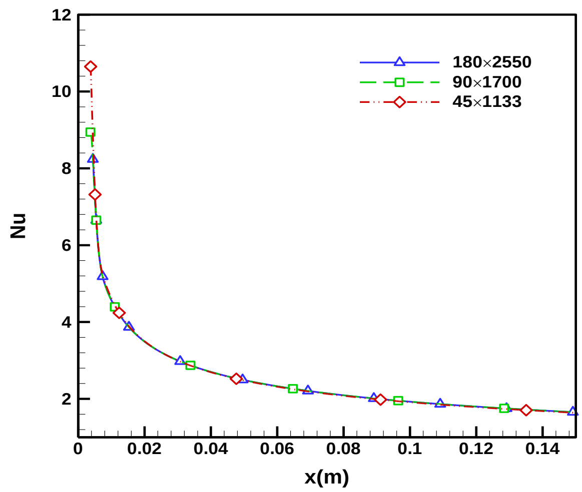
$$PEC = \frac{Nu_{nf} / Nu_f}{(C_{f,nf} / C_{f,f})^{1/3}} \qquad (۱۹)$$

استقلال از شبکه و اعتبارسنجی

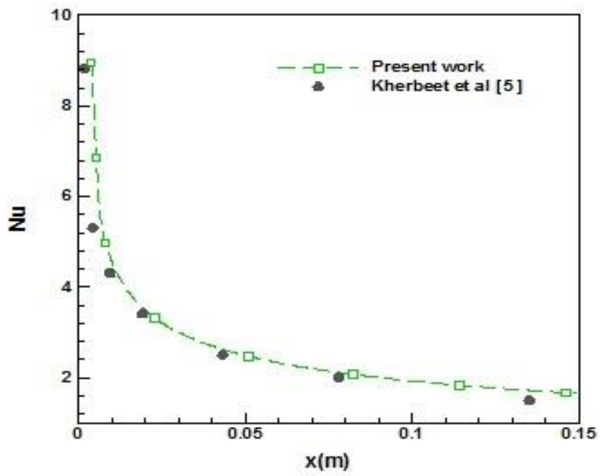
همانطور که قبلا اشاره شد، هندسه مسئله میکروکانال استفاده شده در تحقیق خربیت و همکاران [5] است که ابعاد آن ذکر شده است. در شکل (۲) نتایج مطالعه شبکه برای جریان نانوسیال آب–اکسید آلومنیوم با کسرحجمی یک درصد در عدد رینولدز ۲۸۰ ارائه شده است. شبکه در راستای عرض کانال به نسبت دو برابر و در راستای طول کانال به نسبت ۱/۵ برابر ریزتر می‌شود. اختلاف نتایج در مقدار ماکزیمم عدد ناسلت مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج ارائه شده شبکه ۹۰×۱۷۰۰ به‌عنوان شبکه مناسب انتخاب می‌گردد.

در شکل (۳) نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی خربیت و همکاران [5] مقایسه می‌شود. با توجه به این شکل می‌توان گفت نتایج حاصل از حل عددی برای جریان نانوسیال در میکروکانال معتبر می‌باشند. مطابق شکل بلافاصله بعد از پله عدد نا سلت افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد و پس از آن در طول کانال کاهش می‌یابد.

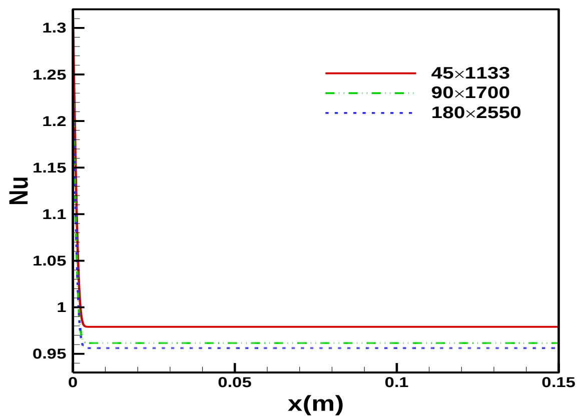
از آنجایی که در ادامه نتایج شبیه سازی‌ها در عدد رینولدز ۱ ارائه می‌گردد، در شکل (۴) نتایج مطالعه شبکه برای جریان نانوسیال آب–اکسید آلومنیوم در این عدد رینولدز نیز ارائه شده است. با توجه به اختلاف کم نتایج برای دو شبکه ریزتر می‌توان نتیجه گرفت که شبکه ۹۰×۱۷۰۰ شبکه مناسبی برای انجام شبیه‌سازی‌ها در عدد رینولدز ۱ می‌باشد.



شکل ۲ تغییرات عدد ناسلت در طول کانال برای شبکه‌های مختلف (Re = 280)



شکل ۳ مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی خربیت و همکاران [5] (Re = 280)



شکل ۴ تغییرات عدد ناسلت در طول کانال برای شبکه‌های مختلف (Re = 1)

نتایج و بحث

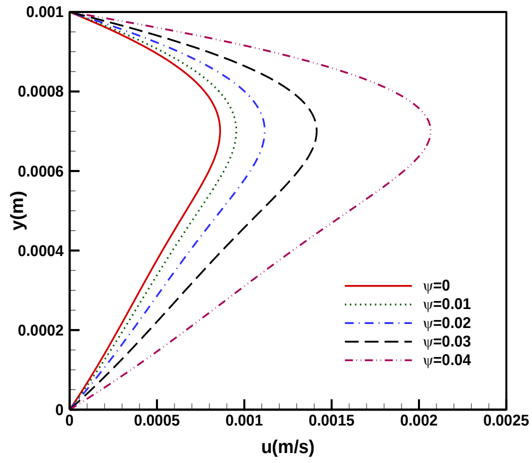
در این بخش، تاثیر میدان مغناطیسی و کسرحجمی روی هیدرودینامیک و انتقال حرارت جریان نانوسیال آب–مس در عدد رینولدز پایین (Re = 1) بررسی می‌گردد. در شکل (۵) توزیع سرعت برای ۴ مقطع مختلف میکروکانال بعد از پله در غیاب میدان مغناطیسی (عدد هارتمن صفر) برای مقادیر مختلف کسرحجمی نشان داده شده است. عدد هارتمن پارامتر بی‌بعد مهم مربوط به میدان مغناطیسی می‌باشد $\left(Ha = D_h B_0 \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}}\right)$. نمودارها ابتدا در مقاطعی نزدیک به پله و سپس با فاصله بیشتری از پله رسم شده‌اند. در شکل (۵– الف) که در نزدیکی پله رسم شده است به علت تغییر ناگهانی سطح مقطع توزیع سرعت به‌صورت نامتقارن و در مقاطع بعدی توزیع سرعت متقارن می‌باشد. در عدد رینولدز یک سرعت نانوسیال پایین بوده و بر خلاف نتایج تحقیقات در اعداد رینولدز بالا [9]، جدایش جریان از لبه تیز پله و تشکیل گردابه پشت پله اتفاق نمی‌افتد. با افزایش کسرحجمی در عدد رینولدز ثابت، لزجت سینماتیکی نانوسیال و در نتیجه سرعت نانوسیال افزایش می‌یابد. مطابق شکل، افزایش سرعت ماکزیمم نانوسیال منجر به افزایش گرادیان سرعت روی دیواره و در نتیجه افزایش تنش برشی روی دیواره می‌شود.

شکل (۶) توزیع سرعت در سه عدد هارتمن مختلف و کسرحجمی دو درصد را در ۴ مقطع متفاوت از کانال نمایش می‌دهد. با توجه به جدول (۱)، مس دارای ضریب رسانایی الکتریکی بسیار بالایی است. این مسئله باعث می‌شود تا نانوسیال آب–مس در کسرحجمی دو درصد دارای ضریب رسانایی الکتریکی بسیار بالایی (1194000 S/m) باشد. از آنجایی که نیروی مغناطیسی اعمالی بر واحد حجم سیال $(-\sigma_{nf} B_0 u)$ [13] می‌باشد، نیروی بسیار زیادی در خلاف جهت جریان اعمال می‌گردد. این امر باعث می‌شود تا در بخش قابل توجهی از عرض کانال سرعت سیال با یک کاهش قابل ملاحظه به مقدار تقریبا یکنواختی برسد. با توجه به ثابت بودن دبی حجمی در کانال شیب سرعت در نزدیک کانال به شدت افزایش می‌یابد. در مقطع (الف)، یک عدم تقارن در توزیع سرعت خصوصا در اعداد هارتمن ۰ و ۲۰ مشاهده می‌شود که ناشی از وجود گردابه در پشت پله می‌باشد. در یک عدد هارتمن مشخص، با دور شدن از گردابه، در مقاطع بعدی تغییر قابل توجهی در توزیع سرعت سیال مشاهده نمی‌گردد.

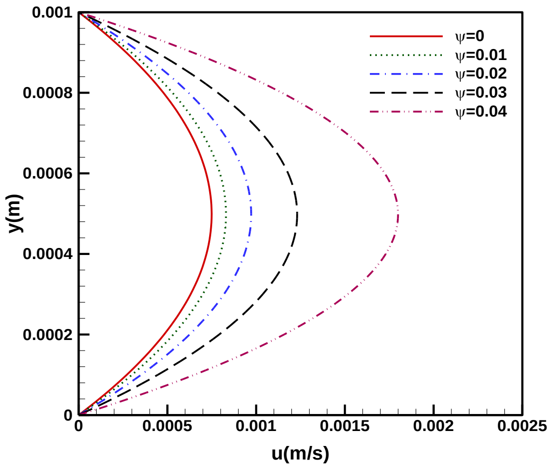
شکل (۷) خطوط جریان در کسرحجمی دو درصد و در سه عدد هارتمن مختلف را در بخشی از کانال نشان می‌دهد. چنانچه ذکر شد، بر خلاف تحقیقات انجام شده در اعداد رینولدز بالا [13]، در این حالت (Re = 1) به‌دلیل سرعت پایین سیال پدیده جدایش جریان از لبه نوک تیز پله و در نتیجه تشکیل گردابه رخ نمی‌دهد. در این شکل با نمایش نمای بزرگی از ناحیه بعد از پله و افزایش تمرکز خطوط جریان، عدم تشکیل گردابه چه در غیاب میدان مغناطیسی و چه در حضور آن تایید شده است. چنانچه پیشتر هم ذکر شد، عمل کردن نیروی مغناطیسی اعمالی به عنوان یک نیروی مقاوم در برابر حرکت سیال باعث کاهش حداکثر سرعت نانوسیال می‌گردد که در این شکل نیز مشاهده می‌شود.

همچنین، چنانچه مشاهده می‌گردد نرخ کاهش سرعت ماکزیمم نانوسیال با افزایش شدت میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج ارائه شده در این شکل، در عدد هارتمن ۲۰ حدود ۲۰ درصد کاهش در سرعت ماکزیمم نانوسیال نسبت به عدد هارتمن صفر مشاهده می‌گردد. اما با دو برابر شدن شدت میدان مغناطیسی و افزایش عدد هارتمن به ۴۰، سرعت ماکزیمم تنها حدود ۵ درصد دیگر کاهش می‌یابد.

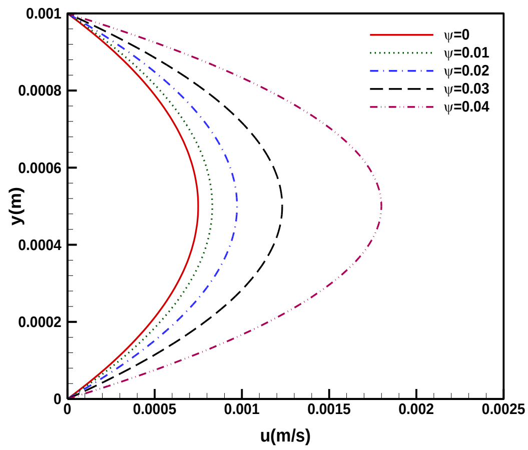
شکل (۸) توزیع ضریب اصطکاک دیواره در کسرحجمی دو درصد با افزایش عدد هارتمن را نشان می‌دهد. در عدد هارتمن و عدد رینولدز ثابت، ضریب اصطکاک تنها وابسته به گرادیان سرعت روی دیواره است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۶)، ضریب اصطکاک روی دیواره بعد از پله به‌دلیل عدم تغییر قابل توجه در شیب سرعت در طول کانال، تقریبا ثابت باقی می‌ماند. چنانچه در شکل (۶) مشاهده می‌گردد، با افزایش عدد هارتمن یا به عبارتی با افزایش شدت میدان مغناطیسی، گرادیان سرعت روی دیواره افزایش می‌یابد. همانطور که درتفسیر شکل (۶) مطرح شد، علت این امر، کاهش سرعت سیال تحت اثر میدان مغناطیسی و در عین حال ثابت بودن دبی می‌باشد. در واقع، کاهش سرعت سیال در نواحی مرکزی کانال تحت اثر میدان مغناطیسی با افزایش سریع سرعت سیال در نزدیکی دیواره جبران می‌گردد. این امر منجر به افزایش ضریب اصطکاک با افزایش شدت میدان مغناطیسی می‌شود.



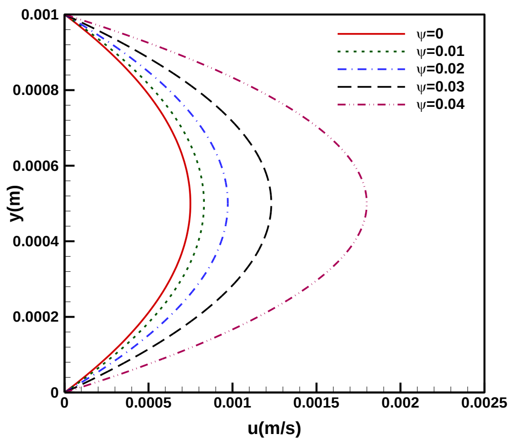
(الف) x=0.0005m



(ب) x=0.0015m

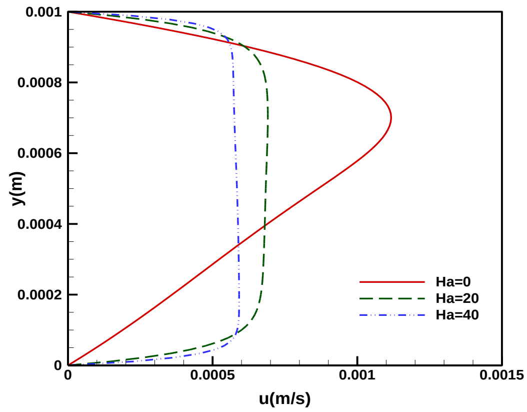


(د) x=0.005m

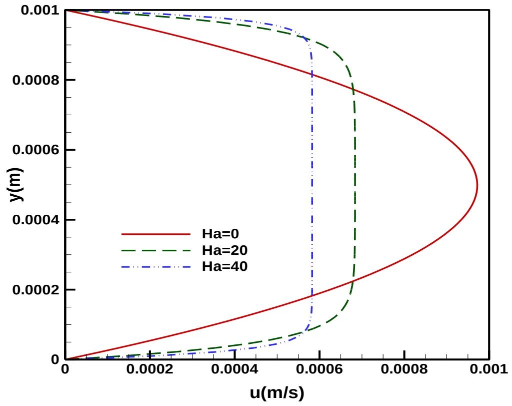


(ه) x=0.01m

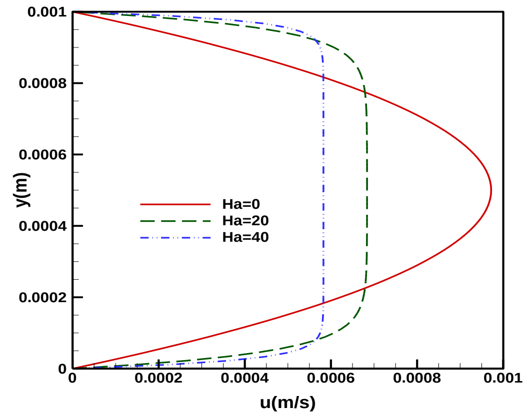
شکل ۵ توزیع سرعت در مقاطع مختلف کانال در غیاب میدان مغناطیسی



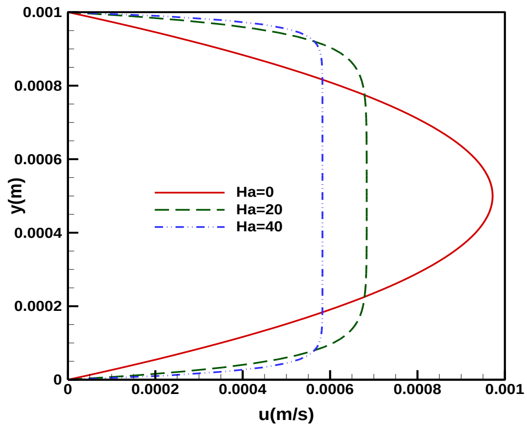
x=0.0005m (الف)



x=0.0015m (ب)

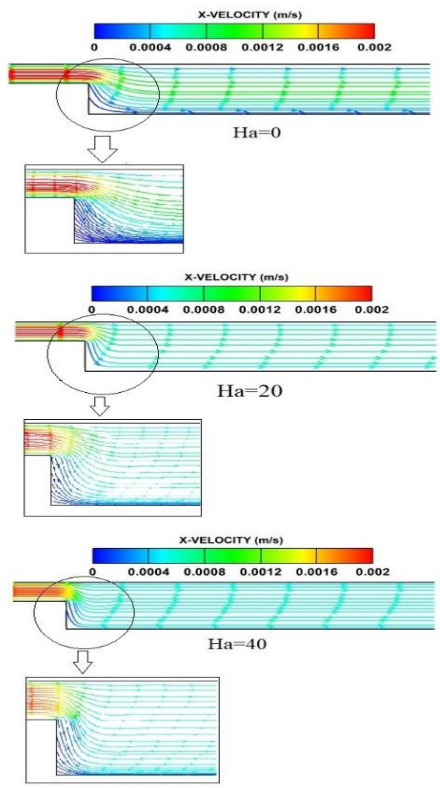


x=0.005m (ج)

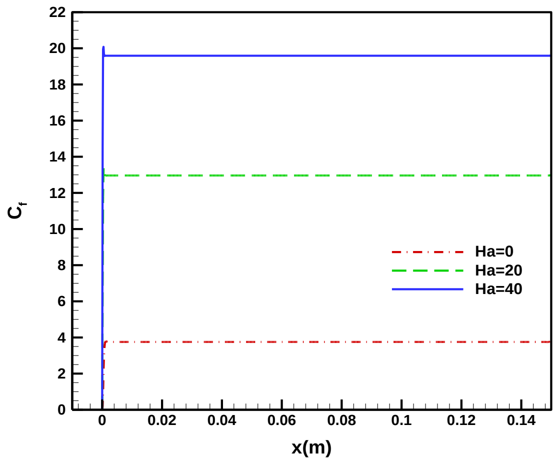


x=0.01m (د)

شکل ۶ توزیع سرعت در مقاطع مختلف کانال در $\psi = 0.02$



شکل ۷ خطوط جریان در کسرحجمی دو درصد

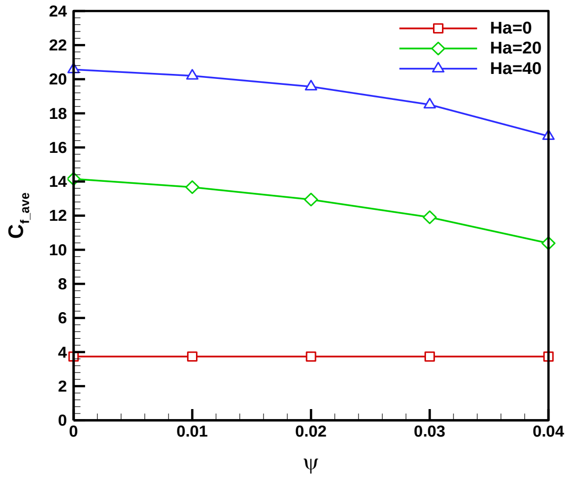


شکل ۸ تغییرات ضریب اصطکاک با عدد هارتمن $(\psi = 0.02)$

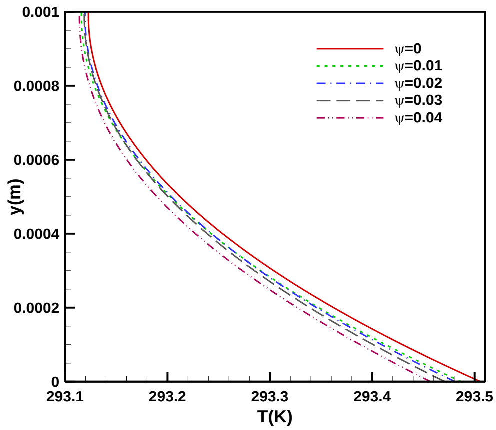
شکل (۹) تغییرات ضریب اصطکاک متوسط با افزایش کسرحجمی در سه عدد هارتمن مختلف را نشان می‌دهد. در عدد هارتمن صفر (بدون میدان مغناطیسی) افزایش کسرحجمی تأثیر ناچیزی بر روی ضریب اصطکاک دارد. مطابق شکل (۵)، با افزایش کسرحجمی گرادیان سرعت و در نتیجه تنش برشی روی

دیواره افزایش می‌یابد. از طرفی، با افزایش کسرحجمی در عدد رینولدز ثابت به علت افزایش لزجت سینماتیکی نانوسیال، سرعت و در نتیجه فشار دینامیکی آن افزایش می‌یابد. افزایش فشار دینامیکی سیال به گونه‌ای است که تقریبا افزایش تنش برشی را خنثی می‌کند و در نتیجه تغییری در ضریب اصطکاک با افزایش غلظت نانوذرات مشاهده نمی‌شود. در اعداد هارتمن ۲۰ و ۴۰ با افزایش کسرحجمی، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. در این حالت افزایش فشار دینامیکی سیال (ناشی از افزایش سرعت متوسط سیال) بیشتر از افزایش تنش برشی دیواره می-باشد.

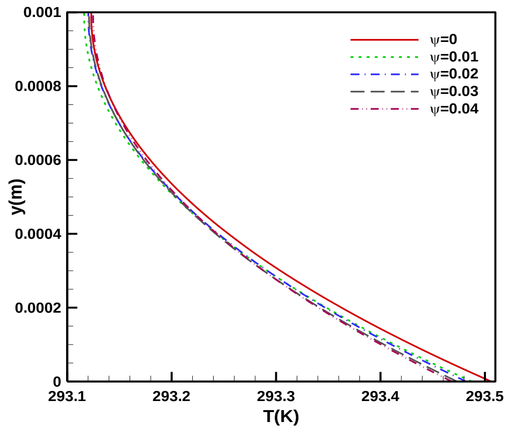
شکل (۱۰) توزیع دما در ۴ مقطع مختلف در عدد هارتمن صفر و مقادیر کسرحجمی متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود. افزایش کسرحجمی سبب کاهش گرادیان دما در دیواره و در نتیجه کاهش انتقال حرارت به نانوسیال می شود. مقطع الف در نزدیکی پله و سایر مقاطع با فاصله بیشتری از پله می‌باشند. در مقطع الف، اثر افزایش کسرحجمی روی کاهش گرادیان دمای دیواره مشهودتر می‌باشد.



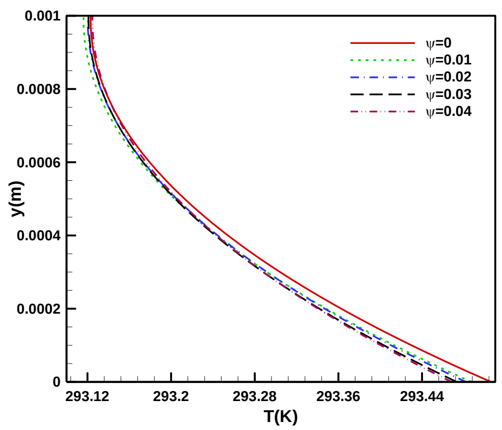
شکل ۹ تغییرات ضریب اصطکاک متوسط با کسرحجمی در اعداد هارتمن مختلف



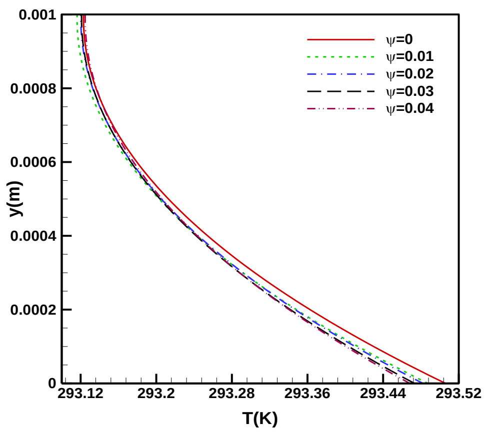
x=0.003m (الف)



x=0.005m (ب)



x=0.01 m (ج)

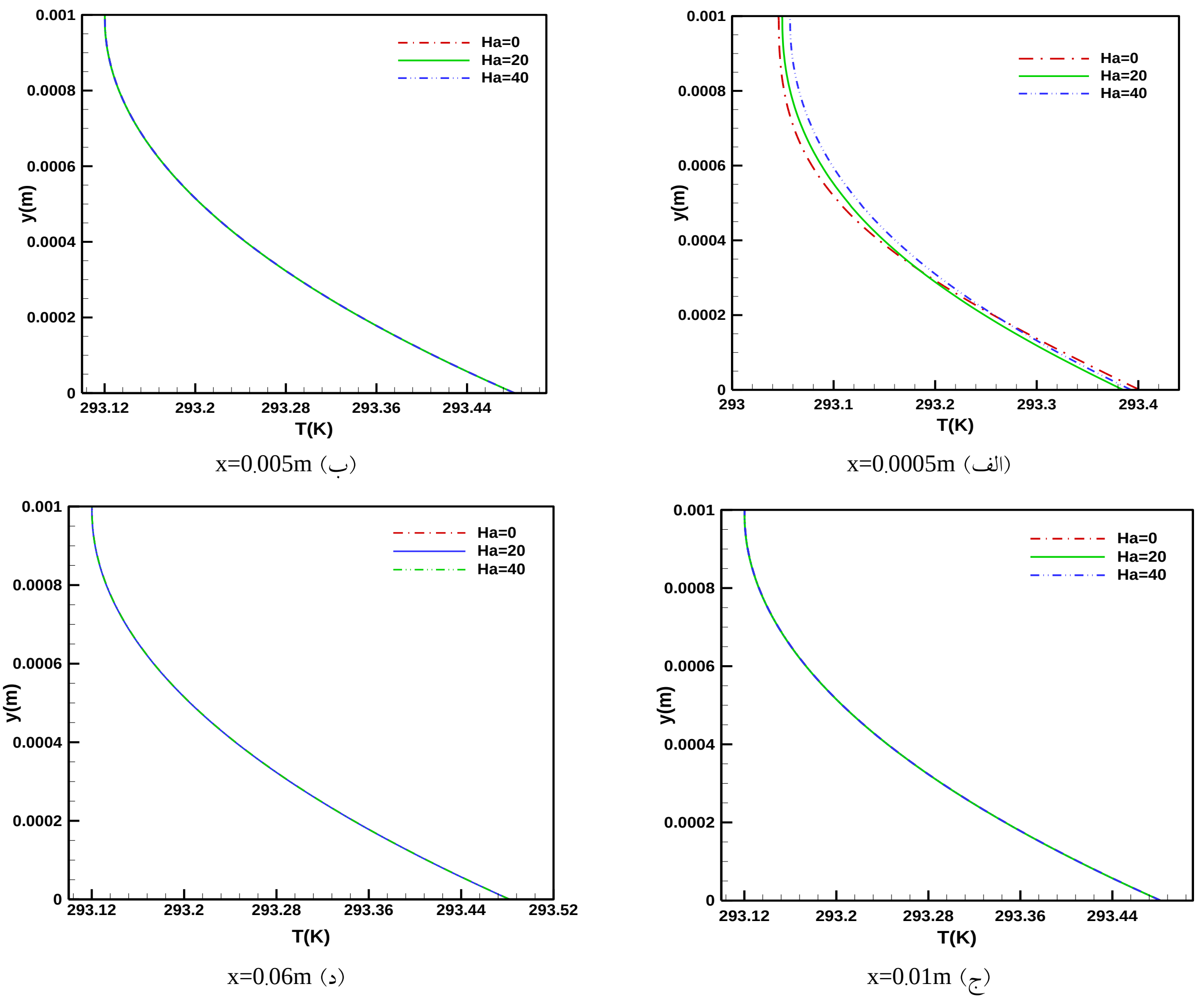


x=0.06m (د)

شکل ۱۰ توزیع دما در مقاطع مختلف کانال در غیاب میدان مغناطیسی

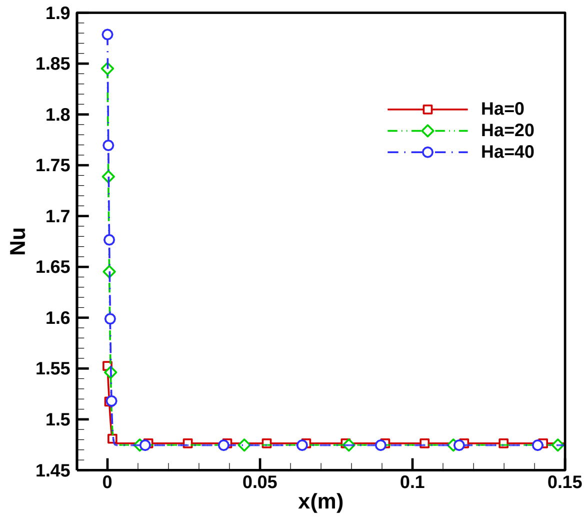
شکل (۱۱) توزیع دما در کسرحجمی دو درصد در سه عدد هارتمن مختلف را در مقاطع مختلف کانال بعد از پله نشان می‌دهد. در مقطع الف (نزدیک پله) با افزایش شدت میدان مغناطیسی، گرادیان دما روی دیواره افزایش می‌یابد. در سایر مقاطع از شکل، افزایش عدد هارتمن تأثیری بر روی توزیع دما ندارد. بر اساس شکل (۶)، با اعمال میدان مغناطیسی توزیع سرعت نانوسیال تحت تاثیر قرار می گیرد. با این وجود، به علت سرعت بسیار کم نانوسیال در عدد رینولدز ۱ مکانیزم جابه‌جایی تاثیر مهمی در انتقال حرارت ندارد و مکانیزم غالب رسانش می-باشد. به همین دلیل در عدد رینولدز پایین، اعمال میدان مغناطیسی اثر قابل توجهی بر توزیع دمای نانوسیال ندارد.

شکل (۱۲) تغییرات عدد ناسلت در طول کانال در کسرحجمی دو درصد در سه عدد هارتمن مختلف را نمایش می‌دهد. تنها بلافاصله بعد از پله مقدار عدد ناسلت با افزایش شدت میدان افزایش داشته است. بنابراین، میدان مغناطیسی اعمال‌شده تأثیر قابل توجهی بر روی عدد ناسلت ندارد. علت این امر، عدم تاثیر قابل توجه میدان مغناطیسی بر توزیع دمای نانوسیال (مطابق شکل ۱۱) به علت تاثیر ناچیز مکانیزم جابه‌جایی و غالب بودن مکانیزم رسانش حرارتی در عدد رینولدز ۱ می‌باشد. این امر در تضاد با نتایج تحقیقات قبلی [13] در اعداد رینولدز بالاست که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، افزایش عدد ناسلت را نشان می‌دهند. در شکل (۱۳) نیز که تغییرات عدد ناسلت متوسط با کسرحجمی در اعداد هارتمن متفاوت را نشان می‌دهد، این مساله مشاهده می‌گردد. در عدد رینولدز ۱، با افزایش کسرحجمی گرادیان دما روی دیواره کاهش (شکل ۱۰) و ضریب رسانش حرارتی افزایش می‌یابد. با این وجود، غلبه کاهش گرادیان دما بر افزایش ضریب رسانش حرارتی باعث کاهش شار حرارتی و در نتیجه کاهش عدد ناسلت می‌گردد. این در حالی است که در اعداد رینولدز بالا، افزایش کسرحجمی نانوسیال منجر به افزایش عدد ناسلت می‌گردد [13].

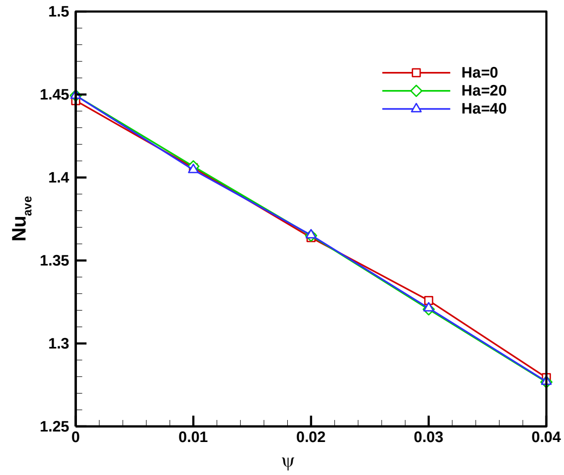


x=0.0005m (الف) x=0.005m (ب)
x=0.01m (ج) x=0.06m (د)

شکل ۱۱ توزیع دما در مقاطع مختلف کانال در $\psi = 0.02$

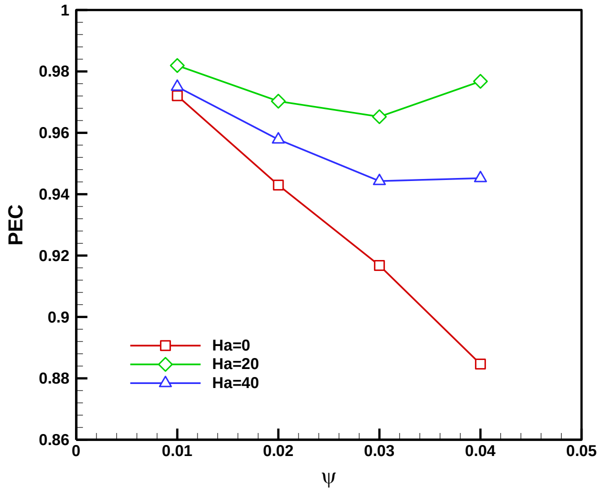


شکل ۱۲ تغییرات عدد ناسلت در طول کانال برای اعداد هارتمن مختلف $(\psi = 0.02)$



شکل ۱۳ تغییرات عدد ناسلت متوسط با کسرحجمی در اعداد هارتمن مختلف

شکل (۱۴) تغییرات ضریب معیار ارزیابی عملکرد نانوسیال را با کسرحجمی و عدد هارتمن نشان می‌دهد. با افزایش کسرحجمی تا کسرحجمی ۳ درصد ضریب عملکرد کاهش می‌یابد. تنها در حضور میدان مغناطیسی، با افزایش کسرحجمی از ۳ درصد به ۴ درصد مقداری افزایش در ضریب عملکرد مشاهده می‌شود. مطابق شکل (۹)، تحت اثر میدان مغناطیسی، کاهش بیشتری در مقدار ضریب اصطکاک متوسط با افزایش کسرحجمی نسبت به حالت بدون میدان مشاهده می‌گردد. این در حالی است که مطابق شکل (۱۳) روند تغییرات عدد ناسلت با کسرحجمی در هر دو حالت با میدان و بدون میدان تقریبا یکسان است. این امر باعث می‌شود که ضریب عملکرد سیستم که با استفاده از رابطه (۱۹) تعریف می‌شود با اعمال میدان مغناطیسی نسبت به حالت بدون میدان افزایش یابد.



شکل ۱۴ معیار ارزیابی عملکرد نانوسیال

نتیجه گیری

در این پژوهش اثر میدان مغناطیسی (عمود بر جهت جریان) بر هیدرودینامیک و انتقال حرارت جریان آرام نانوسیال آب-مس در یک میکروکانال با انبساط ناگهانی یک طرفه در سرعت کم سیال (عدد رینولدز پایین) بررسی شد. معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی می‌باشند. برای اعمال اثر نانوذرات از مدل همگن استفاده گردید.

تاثیر میدان مغناطیسی بر روی بیشینه سرعت و گرادیان سرعت نزدیک دیواره است. با افزایش شدت میدان بیشینه سرعت کاهش و گرادیان سرعت نزدیک دیواره افزایش می‌یابد. اعمال میدان مغناطیسی منجر به یکنواخت شدن توزیع سرعت در نواحی مرکزی کانال می‌شود. با افزایش شدت میدان مغناطیسی در یک کسرحجمی ثابت تنش برشی دیواره و ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. در حضور میدان مغناطیسی، با افزایش کسرحجمی تنش برشی دیواره افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش کسرحجمی سرعت نانوسیال افزایش می‌یابد. این امر سبب می‌شود، ضریب اصطکاک به‌دلیل افزایش بیشتر فشار دینامیکی نسبت به تنش برشی دیواره کاهش یابد. در اعداد رینولدز پایین، بر خلاف اعداد رینولدز بالا، گردابه ای بعد از پله تشکیل نمی‌گردد.

در اعداد رینولدز پایین، بر خلاف اعداد رینولدز بالا، با افزایش کسرحجمی گرادیان دمای سیال روی دیواره و در نتیجه

عدد ناسلت کاهش می‌یابد. همچنین، بر خلاف اعداد رینولدز بالا که اعمال میدان منجر به افزایش عدد ناسلت می گردد، در این حالت میدان مغناطیسی تأثیری بر روی گرادیان دمای سیال و در نتیجه عدد ناسلت ندارد.

در اعداد رینولدز پایین اعمال میدان مغناطیسی، در مقایسه با زمانی که از آب به عنوان سیال ا ستفاده می شود، منجر به بهبود .

عملکرد سیستم می‌گردد. تا کسرحجمی ۳ در صد، با افزودن غلظت نانوذرات ضریب عملکرد سیستم کاهش می‌یابد.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] S. K. Bala, L. K. Saha, M. A. Hossain, "Simulation of forced convection in a channel containing three obstacles over backward and forward facing steps by LBM," *International Journal of Applied and Computational Mathematics*, vol. 5, pp. 1-19, 2019.

[2] J. C. Maxwell, Eds, "*A Treatise on Electricity and Magnetism*," Oxford: Clarendon press, 1873.

[3] S. U. Choi, J. A. Eastman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME Conference*, USA, pp. 99–105, (1995).

[4] O. Mahian, L. Kolsi, M. Amani, P. Estellé, G. Ahmadi, C. Kleinstreuer, J. S. Marshall, M. Siavashi, R.A. Taylor, H. Niazmand, S. Wongwises, "Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows-Part I: Fundamentals and theory," *Physics Reports*, vol. 790, pp.1-48, 2019.

[5]A. Sh. Kherbeet, H. A. Mohammed, B. H. Salman, H. E. Ahmed, O. A. Alawi, "Experimental and numerical study of nanofluid flow and heat transfer over microscale backward-facing step," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 79, pp. 858–867, 2014.

[6] F. Selimefendigil, H. F. Öztop, "Forced convection and thermal predictions of pulsating nanofluid flow over a backward facing step with a corrugated bottom wall," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 110, pp. 231-247, 2017.

[7] H. A. Mohammed, F. Fathinia, H. B. Vuthaluru, S. Liu, "CFD based investigations on the effects of blockage shapes on transient mixed convective nanofluid flow over a backward facing step," *Powder Technology*, vol, 346, pp. 441-451, 2019.

[8] H. Moayedi, "Numerical investigation of the effect of oscillating injection nanofluid flow on forced convection heat transfer enhancement over a backward-facing step," *The European Physical Journal Plus*, vol. 135, pp. 924, 2020.

[9] P. Pournaderi, M. Aram, "Numerical investigation of nanofluid flow and heat transfer over a backward-facing step," *Engineering and Applied Science Research*, vol. 47, pp. 401-413, 2020.

[10] D. Yang, B. Sun, T. Xu, B. Liu, H. Li, "Experimental and numerical study on the flow and heat transfer characteristic of nanofluid in the recirculation zone of backward-facing step microchannels," *Applied Thermal Engineering*, vol. 199, pp.117527, 2021.

[11] T. Onishi, T. Yamamoto, "Numerical Analysis of Effects of Aspect Ratio of Rod-like Nanoparticles on Thermal and Flow Behavior of Nanofluids in Backward-facing Step Flows," *Nihon Reoroji Gakkaishi*, vol. 50, pp.323-332, 2022.

[12] J. Hartmann, F. Lazarus., "Experimental investigations on the flow of mercury in a homogeneous magnetic field," *Munksgaard*, 1937.

[13] F. Selimefendigil, H. Oztop, “Influence of inclination angle of magnetic field on mixed convection of nanofluid flow over a backward facing step and entropy generation,” *Advanced Powder Technology*, vol. 26, pp. 1663–1675, 2015.

[14] Z. Mehrez, A. E. Casfi, “Forced convection magnetohydrodynamic Al2O3–Cu/water hybrid nanofluid flow over a backward-facing step,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 135, pp.1417–1427, 2018.

[15] F. Selimefendigil, C. S. Ozkan, H. Oztop, “Electrical conductivity effect on MHD mixed convection of nanofluid flow over a backward-facing step,” *Journal of Central South University*, vol. 26, pp. 1133–1145, 2019.

[16] S. Hussain, S. E. Ahmed, “Unsteady MHD forced convection over a backward facing step including a rotating cylinder utilizing Fe3O4-water ferrofluid,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 484, pp. 356-366, 2019.

[17] B. P. Geridönmez, H. F. Öztop, “Effects of inlet velocity profiles of hybrid nanofluid flow on mixed convection through a backward facing step channel under partial magnetic field,” *Chemical Physics*, vol. 540, pp. 111010, 2020.

[18] T. D. Manh, A. M. Abazari, M. Barzegar Gerdroodbary, N. D. Nam, R. Moradi, H. Babazadeh, “Computational simulation of variable magnetic force on heat characteristics of backward-facing step flow,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 144, pp.1585-1596, 2021.

[19] K. Ghachem, F. Selimefendigil, B. M. Alshammari, C. Maatki, L. Kolsi, “Coupled Effects of Using Magnetic Field, Rotation and Wavy Porous Layer on the Forced Convection of Hybrid Nanoliquid Flow over 3D-Backward Facing Step,” *Nanomaterials*, vol. 12, p.2466, 2022.

[20] P. Pournaderi, M. Deilami, “Modeling nanofluid droplet impingement on a superheated surface,” *Powder Technology*, vol. 381, pp. 68-81, 2021.

[21] P. Pournaderi, A. R. Pishevar, “A numerical investigation of droplet impact on a heated wall in the film boiling regime,” *Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 1525-1538, 2012.

[22] M. Corcione, “Heat transfer features of buoyancy-driven nanofluids inside rectangular enclosures differentially heated at the sidewalls,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49, pp.1536-1546, 2010.

[23] R. S. Vajjha, D. K. Das, “Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, pp.4675-4682, 2009.

[24] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D.P. DeWitt, *Introduction to heat transfer*, John Wiley & Sons, 2011. [E-book] Available: books.google.com.

[25] A. K. Hilo, A. A. Iborra, M. T. H. Sultan, M. F. A. Hamid, “Experimental study of nanofluids flow and heat transfer over a backward-facing step channel,” *Powder Technology*, vol. 372, pp. 497-505, 2020.